

**CENTRO PAULA SOUZA
FACULDADE DE TECNOLOGIA DE ITAQUERA
PROFESSOR MIGUEL REALE**

**ALEX FRANCISCO MAGRINI DE SOUZA
CÉSAR AUGUSTO MACIEL FERREIRA DOS SANTOS**

**COMPARATIVO ENTRE OS PROCESSOS GMAW E FCAW UTILIZANDO
SISTEMA DE MONITORAMENTO DE SOLDAGEM**

**SÃO PAULO
2023**

**CENTRO PAULA SOUZA
FACULDADE DE TECNOLOGIA DE ITAQUERA
PROFESSOR MIGUEL REALE**

**ALEX FRANCISCO MAGRINI DE SOUZA
CÉSAR AUGUSTO MACIEL FERREIRA DOS SANTOS**

**COMPARATIVO ENTRE OS PROCESSOS GMAW E FCAW UTILIZANDO
SISTEMA DE MONITORAMENTO DE SOLDAGEM**

Trabalho acadêmico realizado como requisito
para a conclusão do curso de tecnologia em
Mecânica: Processos de Soldagem.
Orientador: Prof. Me. Edgar de Souza Dutra

**SÃO PAULO
2023**

FOLHA DE APROVAÇÃO

ALEX FRANCISCO MAGRINI DE SOUZA
CÉSAR AUGUSTO MACIEL FERREIRA DOS SANTOS

Comparativo Entre Os Processos Gmaw E Fcaw Utilizando Sistema De Monitoramento De Soldagem

Trabalho acadêmico realizado como requisito
para a conclusão do curso de tecnologia em
Mecânica: Processos de Soldagem.

Orientador: Prof. Me. Edgar de Souza Dutra

ORIENTADOR

Orientador: Prof. Me. Edgar de S. Dutra

Assinatura: _____

Instituição: FATEC – ITAQUERA

BANCA EXAMINADORA

Prof. _____

Assinatura: _____

Instituição: _____

Data: ____/____/____

Prof. _____

Assinatura: _____

Instituição: _____

Data: ____/____/____

RESUMO

Com a grande evolução dos processos e equipamentos de soldagem, torna-se mais fácil e confiável utilizar os recursos de aquisição de dados de soldagem gerados pelo equipamento para realizar os estudos de custo e produtividade. Na evolução dos processos GMAW (*Gas Metal Arc Welding*) e FCAW (*Flux Cored Arc Welding*), existe a grande dúvida de qual destes processos é o mais produtivo e menos custoso. O objetivo deste trabalho acadêmico é realizar um estudo de custos e produtividade de ambos os processos através da soldagem de dois corpos de prova de iguais características de classificação ASTM A131-DH36, porém, cada um soldado com os respectivos processos utilizando o Gás carbônico (CO₂) como atmosfera de proteção, efetuando o levantamento dos dados de soldagem através do sistema de aquisição de dados da fonte de soldagem, popularmente conhecido como Monitoramento. O sistema de soldagem utilizado é do fabricante *Lincoln Electric* Modelo *Power Wave* S350 e seu sistema de aquisição de dados é o *Lincoln Checkpoint*. O consumível utilizado no processo GMAW foi o de classificação ER70S-6 e no processo FCAW foi o de classificação E71T-1.

Palavras-chave: Processos GMAW; Processos FCAW; Custos; Monitoramento; ASTM.

ABSTRACT

With the huge evolution of the welding processes and the welding equipment, it became easier and more reliable using the welding equipment data acquire resources to make tests and productivity studies. On the GMAW (Gas Metal Arc Welding) and FCAW (Fluxed Cored Arc Welding) processes evolution, there is a great doubt on which of these processes is the one that is more productivity and have less cost. This academic Project aims on a study of Costs and Productivity of both processes making two welding pads with exactly the same characteristics ASTM A131-DH36, but, each one welded with one of the mentioned processes above using the CO₂ gas protection atmosphere, using the welding equipment data acquiring system, usually known as Production Monitoring. The welding system equipment used on this project is the Lincoln Electric S350 model and its welding data acquiring system is the Lincoln Checkpoint. The GMAW welding consumable used was the ER70S-S classification and the FCAW welding consumable used was the E71T-1 classification.

Keywords: GMAW process; FCAW process; Costs; Monitoring; ASTM.

Lista de Ilustrações

Figura 1 - Equipamento básico para soldagem GMAW	8
Figura 2 - Seção transversal de um arco GMAW.....	9
Figura 3 - Visão geral e seção de um arame tubular e arame maciço	10
Figura 4 - Efeito do gás de proteção no perfil do cordão	12
Figura 5 - Legenda da tabela QW-255 do ASME XI	13
Figura 6 - Taxa de deposição para eletrodos tubulares e eletrodos sólidos em função do aumento da corrente	14
Figura 7- Representação da distância contato peça e da projeção do arame (stickout).....	15
Figura 8 - Feixe sônico do transdutor	20
Figura 9 - Descontinuidades em solda em junta de topo	21
Figura 10 - Separação das chapas do metal base.....	23
Figura 11- Esboço da montagem das chapas de teste	25
Figura 12 - Fonte de soldagem.....	27
Figura 13 - Alimentador de arame	27
Figura 14 - Sistema de aquisição de dados de soldagem.....	28
Figura 15 - Balança utilizada na pesagem das peças.....	29
Figura 16 - Corte das chapas para confecção dos corpos de prova	30
Figura 17 - Corte das chapas para confecção dos corpos de prova (2)	30
Figura 18 - Peças com corte final	31
Figura 19 - Chanfro das chapas utilizadas para confecção dos corpos de prova	31
Figura 20 - Peso corpo de prova GMAW antes da soldagem	32
Figura 21 - Peso corpo de prova FCAW antes da Soldagem.....	32
Figura 22 - Peso da bobina de arame maciço antes de realizar a soldagem ...	33
Figura 23 - Peso da bobina de arame tubular antes de realizar a soldagem ...	33
Figura 24 Medição da vazão de gás para a soldagem GMAW	34
Figura 25 - Corpo de prova GMAW Soldado	34
Figura 26 - Corpo de prova FCAW Soldado	35
Figura 27 - Peso da bobina de arame GMAW após a soldagem	35
Figura 28 - Peso da bobina FCAW após a soldagem	36
Figura 29 - Preparação dos corpos para ensaio END.....	39
Figura 30 - Ensaio com líquido penetrante	39
Figura 31 - Aplicação do revelador	40

Figura 32 - Ensaios de Ultrassom.....	41
---------------------------------------	----

Lista de tabelas

Tabela 1 - Custos de soldagem.....	22
Tabela 2 - Requisitos químicos para o material base	24
Tabela 3 - Carbono equivalente produzido pelo TMCP	24
Tabela 4 - Propriedade química típica do arame maciço ER70S-6	25
Tabela 5 - Propriedades mecânicas típicas do arame maciço ER70S-6	26
Tabela 6 - Propriedades mecânicas típicas do arame tubular E71T-1	26
Tabela 7 - Propriedade química típica do arame tubular E71T-1.....	26
Tabela 8 - Taxa de deposição	42
Tabela 9 - Rendimento de deposição.....	43

Lista de abreviaturas e siglas

ASME - Sociedade Americana dos Engenheiros Mecânicos

ASTM - Sociedade Americana para Ensaios e Materiais

AWS - Sociedade Americana de Soldagem

DBCP - Distância do bico de contato à peça

FBTS - Fundação Brasileira de Tecnologia em Soldagem

GMAW – Soldagem a arco de metal com gás

MAG - Gás ativo no metal

MIG - Gás inerte no metal

ZAC - Zona afetada pelo calor

ZF – Zona fundida

ZTA – Zona termicamente afetada

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	5
1.1 Justificativa	6
2 OBJETIVOS	7
2.1 Objetivo geral	7
3 REVISÃO DA LITERATURA.....	8
3.1 Processo GMAW	8
3.7 Custos em soldagem	21
4 MATERIAIS E MÉTODOS	23
4.1Materiais	23
4.1.6 BALANÇA.....	28
4.1.7 TAXA DE DEPOSIÇÃO	29
4.1.8 RENDIMENTO DE DEPOSIÇÃO.....	29
4.2 Métodos.....	29
4.2.1CORTE DAS CHAPAS	29
5 RESULTADOS	38
5.1 ENSAIOS DE END	38
5.1.1 ENSAIO VISUAL	38
5.2 Líquido Penetrante	39
5.2.1 Aplicação revelador	40
5.3 Ultrassom	41
5.3.1 Composição química	41
5.4 Taxa de deposição	42
5.5 Rendimento de deposição	42
5.6 Custos	43
5.6.1 Custos calculados (Reais)	43
6 CONCLUSÃO	46

1 INTRODUÇÃO

Diante a necessidade das empresas em permanecerem competitivas no mercado, é de conhecimento geral a busca por melhorias contínuas nos processos de fabricação, objetivando custos menores, maior produtividade e melhor qualidade. Atualmente, existe no mercado de soldagem uma vasta gama de produtos e softwares que visam o aprimoramento do processo realizando o monitoramento da soldagem, bem como facilitando os cálculos de aporte térmico por realizar a leitura instantânea da energia depositada em cada cordão de solda. Além disso, estas ferramentas conseguem mostrar tudo o que aconteceu durante a soldagem, por exemplo, tensão e corrente médias, velocidade de alimentação do arame consumível, tempo de soldagem de cada cordão, energia em kilojoules ou kilowatts de cada um dos cordões e, com todos estes dados, é possível verificar o custo de cada uma destes processos. Os equipamentos munidos da capacidade de monitoramento da soldagem foram desenvolvidos no final dos anos 90 e começaram a obter ascensão entre 2010 e 2015. A princípio, estes equipamentos necessitavam estar conectados a um computador que recebia as informações de soldagem realizadas pela fonte. Com o avanço tecnológico da internet e da eletrônica, hoje basta que estes mesmos equipamentos estejam conectados à internet. Eles enviam estas informações a uma conta em nuvem, desta forma, podendo ser acessados a qualquer hora e qualquer lugar, por um dispositivo móvel ou computador que possua conexão com a internet. Os processos GMAW (*Gas Metal Arc Welding*) e FCAW (*Flux Cored Arc Welding*) são denominados semiautomáticos por possuírem um dispositivo que faz a alimentação contínua do arame consumível e costumam, na maioria dos casos, serem os processos de maior produtividade quando falamos em solda a arco. Na maioria das vezes, quando se tratando do processo GMAW com o uso de transferência *Spray*, não é necessário retrabalho por motivos de aparência de cordão, porém, quando envolvemos o uso do CO₂ como atmosfera de proteção, o retrabalho pode ser um problema devido o índice de respingos gerados, o que ocorre com frequência muito menor quando se utiliza uma mistura gasosa de CO₂ e Argônio. O processo FCAW por si gera uma escória a qual é necessária remoção após a soldagem, o que gera maior tempo de retrabalho e de certa forma acaba por aumentar os custos finais do processo.

Tanto o GMAW quanto o FCAW podem ser utilizados em uma variedade de aços, tais como os de baixo carbono, inoxidáveis entre outras ligas ferrosas. Outra característica

que deve ser salientada sobre ambos os processos é a produtividade efetiva, podendo ambos serem automatizados. Ambos são utilizados tanto em pequenas oficinas quanto em indústrias de grande porte. GMAW e FCAW possuem uma série de estudos comparativos de produtividade e custos (Vários destes comparativos são encontrados em dissertações de mestrado e sites especializados em soldagem, tal como o Infosolda), de soldagem, mas não utilizando-se exclusivamente da atmosfera protetora CO₂ e um sistema de aquisição de dados de um fabricante de equipamentos que já possua tal sistema consolidado no mercado há um tempo considerável. Um comparativo de custos como este pode também verificar qual destes dois processos tem um custo menor considerando o retrabalho por remoção de respingos. Este estudo faz a utilização do aço naval especificado pela norma ASTM A131-DH36, o qual, diferente da maioria dos aços carbono comuns, utiliza todos os elementos disponíveis para o cálculo do carbono equivalente, tornando-o ideal como objeto de estudos acadêmicos e testes metalúrgicos.

1.1 Justificativa

A necessidade em aumentar a produtividade para atender as demandas e ao mesmo tempo reduzir os custos do processo é a principal justificativa deste trabalho acadêmico. Ambos os processos GMAW e FCAW com atmosfera de proteção por CO₂ são amplamente utilizados e conhecidos, e um comparativo de custos utilizando exatamente os mesmos materiais, a fonte de soldagem, gás de proteção e velocidade de soldagem nos mostra valores reais. Estes valores são ainda mais precisos do que os obtidos de maneira convencional, uma vez que o sistema de monitoramento da fonte de soldagem avalia o processo de forma instantânea, inclusive com estimativa de deposição.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo geral

Realizar comparativos econômicos entre os processos de soldagem GMAW e FCAW utilizando um sistema de aquisição de dados, comparando com o método convencional.

1.2.1 Objetivos específicos

Realizar o comparativo de custos entre os processos GMAW e FCAW:

- Realizar a soldagem de duas amostras para os testes;
- Comparar as características técnicas de ambos os processos;
- Calcular os custos da soldagem.

2. REVISÃO DA LITERATURA

Denomina-se soldagem ao processo de união entre duas partes metálicas, usando uma fonte de calor, com ou sem aplicação de pressão. A solda é o resultado desse processo (BRANDI, 1992). Suas aplicações vão desde a fabricação de grades e portões até equipamentos da indústria petrolífera e nuclear, (BRACARENSE, 2009).

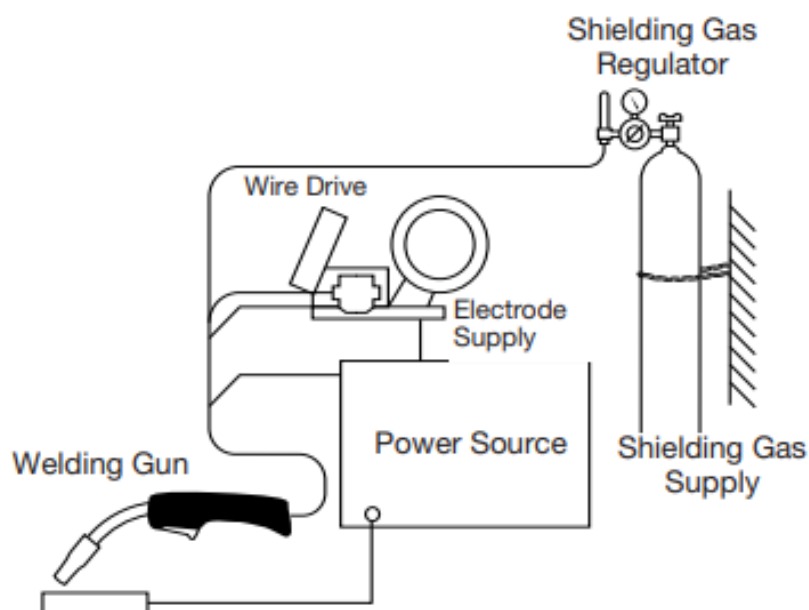
Os processos de soldagem GMAW e FCAW são muito semelhantes quando comparamos os equipamentos e técnicas de soldagem utilizadas, porém, quando aplicados mostram-se distintos em algumas características. Este capítulo apresenta como os processos são utilizados e suas diferenças básicas.

Neste capítulo, também é apresentado um breve resumo de como funciona um sistema de aquisição de dados de soldagem convencional.

2.1 Processo GMAW

O processo *Gas Metal Arc Welding* (GMAW), por definição, é um processo de soldagem ao arco o qual produz a coalescência dos metais, os esquentando com um arco entre um metal eletrodo alimentado continuamente e a obra. O processo utiliza uma proteção externa de um gás fornecido externamente para proteger a poça de fusão (*Gás Metal Arc Welding Guidelines, Lincoln Electric, 2014*).

Figura1- Equipamento básico para soldagem GMAW

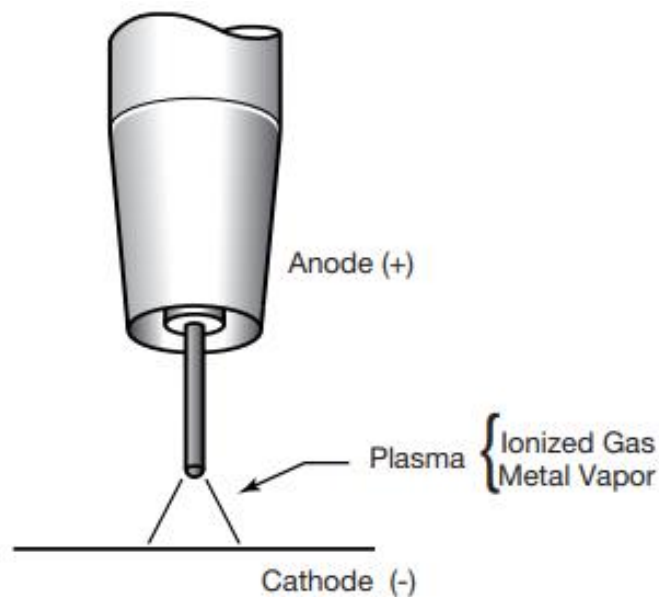


Fonte: *Lincoln Electric (2014)*

Segundo Lincoln Electric (2014), a área do arco de soldagem é uma região de alta complexidade que é composta por forças físicas e reações químicas. A interação dos componentes do arco afeta a transferência metálica e a qualidade final da soldagem. O comportamento do arco é influenciado por:

- O tipo e diâmetro do metal de adição
- As condições do metal de base – Limpeza ou carepa
- O gás de proteção
- Os parâmetros de soldagem – Tensão e Corrente
- A interação das forças físicas – gravidade, tensão superficial, força de jato, e força eletromagnética.

Figura 2 - Seção transversal de um arco GMAW



Fonte: Lincoln Electric (2014)

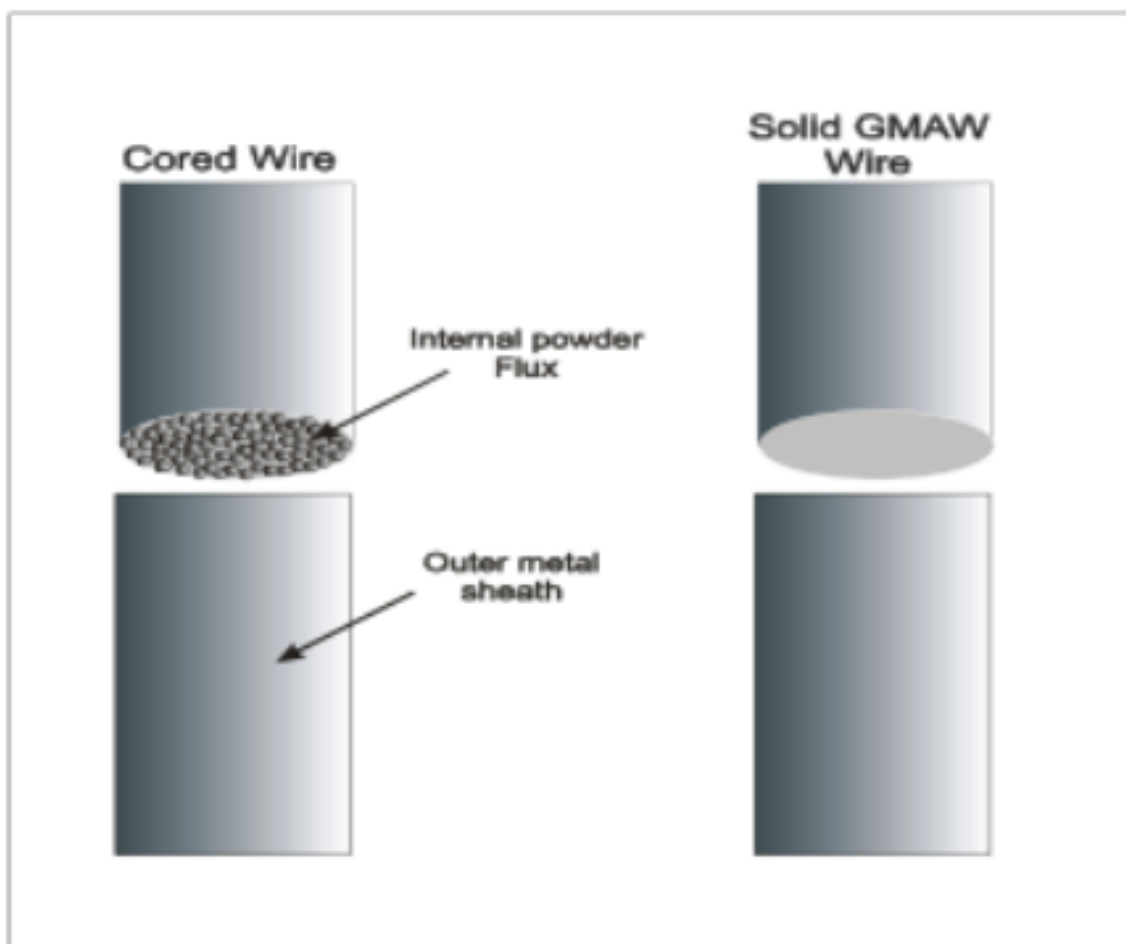
Até os anos 1970s o processo de eletrodo revestido era o método de soldagem mais dominante. Hoje o MIG/MAG é obviamente o principal concorrente nos países mais industrializados. O *Gas metal arc welding* (GMAW) também pode ser referido como MIG (*metal inert gas*) se o gás de proteção for inerte, tal como o argônio, ou MAG (*metal active gas*) se o gás possuir um gás ativo, tal como o CO₂ (WEMAN; 2003).

2.2 Processos FCAW

Existe uma semelhança na utilização de gás de proteção entre o Processo GMAW com o FCAW (*Flux Cored Arc Welding*) ou arame tubular, porém, o FCAW apresenta fluxo no seu interior, possui características operacionais totalmente distintas do GMAW e tem especificações próprias. (Revista da Soldagem -ANO II - Nº05 - ABS-Soldagem).

Os arames dos processos FCAW são diferentes, pelo fato deste possuir um formato tubular, tendo em seu núcleo um fluxo composto por materiais inorgânicos e/ou metálicos que possuem várias funções, entre as quais a melhoria das características do arco elétrico, a transferência do metal de solda, a proteção do banho de fusão e em alguns casos a adição de elementos de liga, além de atuar como formador de escória (SOUZA, 2011).

Figura 3 - Visão geral e seção de um arame tubular e arame maciço



Fonte: INFLUENCE OF WELDING PARAMETERS ON WELD (2014)

2.3 Consumíveis para o processo GMAW E FCAW

2.3.1 Arames maciços

O desenvolvimento da soldagem moderna teve elevado avanço a partir da Revolução Industrial, principalmente em razão da descoberta do arco elétrico, ocorrida em 1801. Já em 1877 foi desenvolvida a soldagem por resistência, que era um processo de soldagem bastante prático. (TREAL, 2018)

Segundo Treal, em 1885, foi desenvolvida a soldagem por arco elétrico, que fazia uso de um eletrodo de grafite. Mais tarde houve a substituição por um arame metálico que décadas depois se tornaria o processo de solda mais popular entre todos até os dias de hoje.

Já a primeira máquina de solda portátil foi inventada em 1911, sendo que em 1916, foi desenvolvida a primeira versão do processo de soldagem MIG/MAG (*Metal Inert Gas*). (TREAL, 2018)

Existe uma faixa muito grande de tipos ou classificação de arame para os processos GMAW. A maioria dos arames se encontra em especificações da AWS (Associação Americana de Soldagem). As classificações mais comuns são: arames para aços carbono, aços de baixa liga, aços inoxidáveis, cobre, alumínio, ligas de níquel e titânio. Os arames contemplam ainda outras especificações e normas. (SUMIG, 2018)

2.3.2 Arames tubulares

Os arames tubulares foram desenvolvidos na década de 50 e tiveram a disponibilidade comercial em 1957 e teve uma grande utilização nas décadas de 60 e 70 devido crescimento na utilização do arame nos processos.

Os arames tubulares foram desenvolvidos para atender às necessidades das empresas de aumentar a competitividade e de reduzir custos o processo surgiu através das melhores combinações da característica da soldagem por arco submerso e a soldagem empregando o dióxido de carbono (CO₂) como gás de proteção. Através da combinação da proporção de gás e combinação dos elementos contidos no núcleo do arame obtemos uma solda de alta qualidade, baixo nível de respingo e um arco mais estável. (ESAB; 2014)

2.3.3 Influência do gás de proteção nos processos de soldagem

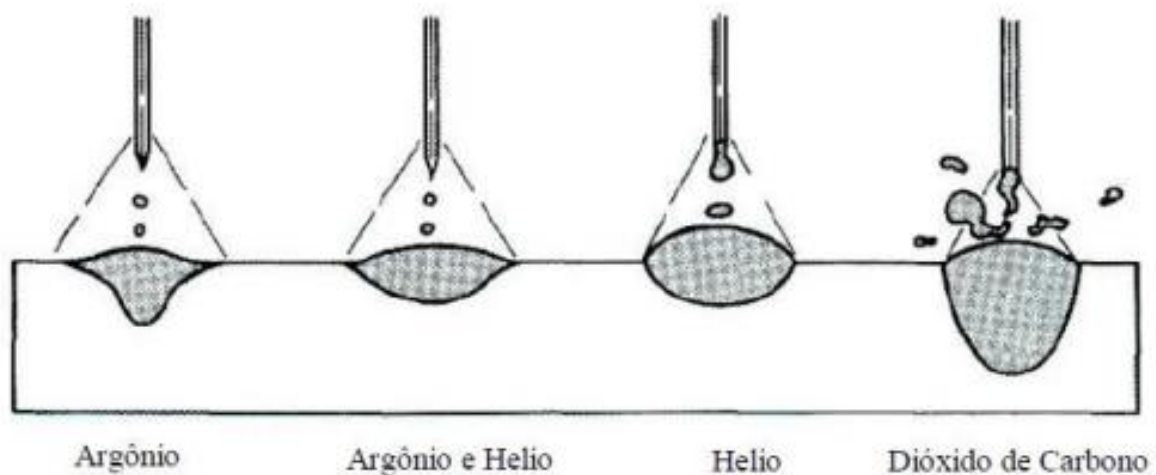
Os gases de proteção utilizados na soldagem têm a finalidade de proteger a poça de fusão e manter a integridade do cordão de solda de possíveis contaminações o gás industrial contribuiu significativamente com a indústria da soldagem, produzindo e purificando gases diferentes e misturas de gases.

Uma grande influência dos gases nas características do arco, e na transferência de metal e velocidades de soldagem e penetração e na forma externa da solda, (QUITES, 2002).

Os Gases como Argônio e Hélio puro produzem excelentes resultados na soldagem de materiais não ferrosos. No entanto, na soldagem com materiais ferrosos, esses gases produzem cordões irregulares, (BARBEDO, 2011).

A FIGURA 4 mostra os efeitos na geometria do cordão, quando são utilizados gases de proteção.

Figura 4 - Efeito do gás de proteção no perfil do cordão



Fonte: BELTRÁN (2019).

Na soldagem utilizando gás inerte (MIG), o gás utilizado pode ser Ar (Argônio), He (Hélio), ou misturas de gases ricos em Ar complementadas com He, O₂ (Oxigênio) ou CO₂ (dióxido de carbono). O gás inerte atua na proteção da região soldada, além de auxiliar na abertura e manutenção do arco voltaico. (ESAB; 2021)

2.4 Variáveis do Processo GMAW e FCAW

A tabela QW-255 do ASME XI especifica as mesmas variáveis tanto para o processo GMAW quanto para o processo FCAW, conforme Figura 5.

Figura 5 - Legenda da tabela QW-255 do ASME XI

Table QW-255 Welding Variables Procedure Specifications (WPS) — Gas Metal-Arc Welding (GMAW and FCAW)						
Paragraph		Brief of Variables		Essential	Supplementary Essential	Nonessential
QW-402 Joints	.1	φ Groove design				X
	.4	— Backing				X
	.10	φ Root spacing				X
	.11	± Retainers				X
QW-403 Base Metals	.5	φ Group Number			X	
	.6	T Limits			X	
	.8	φ T Qualified	X			
	.9	t Pass > 1/2 in. (13 mm)	X			
	.10	T limits (S. cir. arc)	X			
	.11	φ P-No. qualified	X			
QW-404 Filler Metals	.4	φ F-Number	X			
	.5	φ A-Number	X			
	.6	φ Diameter				X
	.12	φ Classification			X	
	.23	φ Filler metal product form	X			
	.24	± or φ Supplemental	X			
	.27	φ Alloy elements	X			
	.30	φ t	X			
	.32	t Limits (S. cir. arc)	X			
	.33	φ Classification				X
QW-405 Positions	.1	+ Position				X
	.3	φ T & Vertical welding				X
QW-406 Preheat	.1	Decrease > 100°F (55°C)	X			
	.2	φ Preheat maint.				X
	.3	Increase > 100°F (55°C) (IP)			X	
QW-407 PWHT	.1	φ PWHT	X			
	.2	φ PWHT (T & T range)			X	
QW-408 Gas	.1	± Trail or φ comp.				X
	.2	φ Single, mixture, or %	X			
	.3	φ Flow rate				X
	.5	± or φ Backing flow				X
	.9	— Backing or φ comp.	X			
	.10	— Trail or φ comp.	X			
QW-409 Electrical Characteristics	.1	> Heat input			X	
	.2	φ Transfer mode	X			
	.4	φ Current or polarity			X	X
	.8	φ I & E range				X

Table QW-255 Welding Variables Procedure Specifications (WPS) — Gas Metal-Arc Welding (GMAW and FCAW) (Cont'd)						
Paragraph		Brief of Variables		Essential	Supplementary Essential	Nonessential
QW-410 Technique	.1	φ String or weave				X
	.3	φ Orifice, cup, or nozzle size				X
	.5	φ Method cleaning				X
	.6	φ Method back gouge				X
	.7	φ Oscillation				X
	.8	φ Tube-work distance				X
	.9	φ Multiple to single pass per side			X	X
	.10	φ Single to multiple electrodes			X	X
	.15	φ Electrode spacing				X
	.25	φ Manual or automatic				X
	.26	± Peening				X
	.64	Use of thermal processes	X			

Legend:

+ Addition
— Deletion

> Increase or greater than
< Decrease or less than

† Uphill
‡ Downhill

← Forehand
→ Backhand

φ Change

Fonte: ASME XI The American Society of Mechanical Engineers (2019)

O processo de Eletrodo tubular pode ter seu desempenho influenciado por variáveis diversas um melhor entendimento do comportamento do processo pode auxiliar na forma como estas variáveis podem interferir. Dentre as principais variáveis pode-se citar:

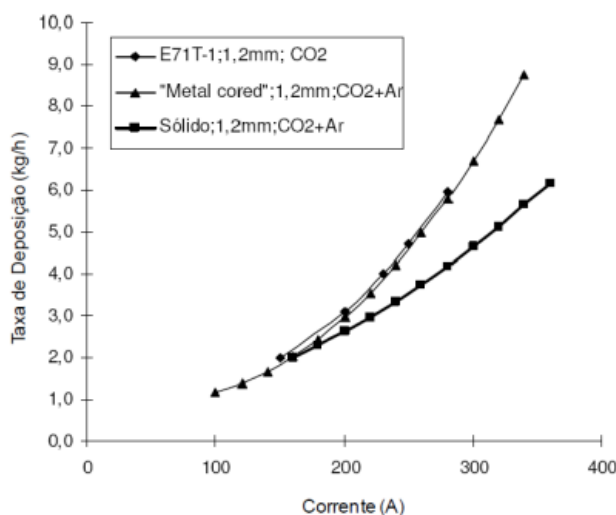
- Tensão e Corrente;
- Velocidade de Soldagem;
- DBCP e Comprimento de Eletrodo

2.4.1 Tensão e Corrente

A tensão de soldagem ou tensão do arco é uma variável significativa quanto à geometria da solda, a aparência e a penetração, pois afeta tanto o modo de transferência metálica como o comprimento do arco. A largura do cordão de solda é uma função da potência do arco. Para uma corrente de soldagem constante, o aumento da tensão resulta num aumento da largura do cordão de solda, (WAINER *et al.*, 1992; MARQUES, 2015).

A corrente de soldagem tem grande efeito no processo Eletrodo Tubular por se tratar de uma variável que influencia diretamente no processo sendo que a taxa de deposição e a penetração do processo são diretamente proporcionais ao aumento da corrente de soldagem conforme (SALES, 2001). À medida que se trabalha com uma corrente de soldagem maior, em equipamentos com fonte convencional de energia, as taxas de deposição com eletrodos tubulares, incluindo o “*metal cored*”, aumentam, conforme mostra a Figura 6 (WIDGERY, 1994).

Figura 6 - Taxa de deposição para eletrodos tubulares e eletrodos sólidos em função do aumento da corrente



Fonte: Adaptado de WIDGERY (1994).

2.4.2 Velocidade de Soldagem

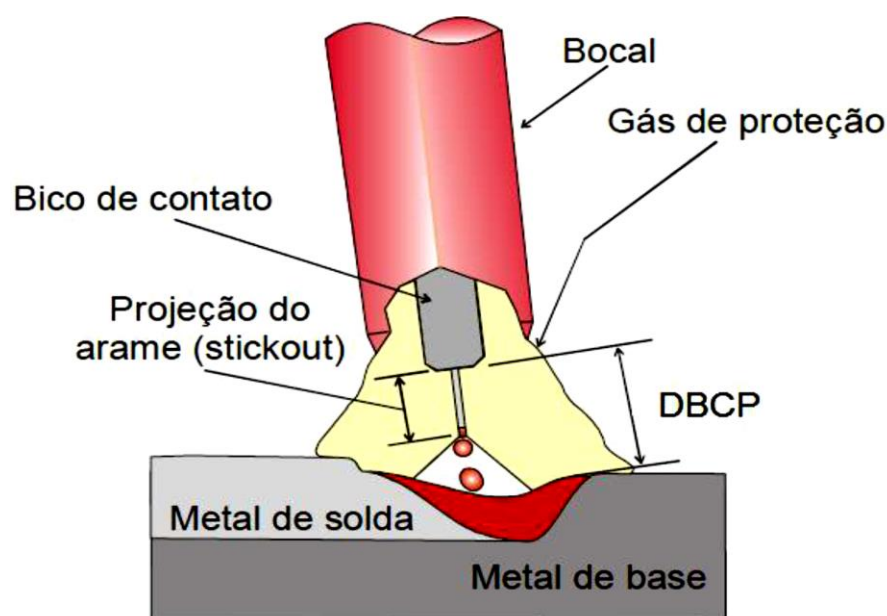
A velocidade de soldagem influencia a energia de soldagem, e assim, a quantidade de calor cedido à peça (MARQUES; MODENESI; BRACARENSE, 2011). A velocidade de soldagem para o arame tubular apresenta o mesmo comportamento que o arame maciço influenciando na penetração de forma descontínua, ou seja, primeiro aumenta a penetração com o aumento da velocidade de soldagem e depois diminui com o aumento da velocidade de soldagem, sendo máxima para velocidades intermediárias (GOMES; 2006).

2.4.3 DBCP e Comprimento de Eletrodo

O comprimento do arame livre (*"Stick out"*) é o comprimento não fundido do eletrodo a partir do bico de contato até a peça.

A DBCP é diretamente proporcional ao calor gerado por Efeito Joule e indiretamente proporcional a corrente de soldagem necessária para fundir o arame (BRACARENSE, 2000). Fixando -se a velocidade de alimentação do arame, qualquer aumento na distância bico de contato peça (DBCP) e conseqüentemente do comprimento livre do eletrodo, tem o efeito de reduzir a corrente (Figura 7).

Figura 7 - Representação da distância contato peça e da projeção do arame (stickout)



Fonte: Adaptado de BARRA (2003, p.18)

2.5 Metalurgia

Segundo Taniguchi (1992), a maioria dos processos de soldagem utiliza calor como principal fonte de energia. O calor é, portanto, elemento essencial à execução de uma junta soldada de boa qualidade.

Taniguchi (1992) ainda cita em sua obra que entre os fatores que devem ser considerados no estudo da transferência de calor em juntas soldadas, são os seguintes os mais importantes:

- Aporte de energia ou de calor à junta soldada, também denominado insumo de calor ou energia;
- Rendimento térmico do arco elétrico;
- Distribuição e picos de temperatura (ciclo térmico) durante a soldagem;
- Tempo de permanência nessas temperaturas; e
- Velocidade de resfriamento nas juntas de solda.

2.5.1 Energia imposta

Segundo Taniguchi (1992), na soldagem costuma-se trabalhar com uma grandeza denominada aporte de energia ou aporte de calor, que correlaciona a quantidade de energia disponível para a soldagem com a velocidade “v” de avanço da fonte de calor, ou seja, do eletrodo. A Equação 1 mostra como este cálculo é feito em cm/min:

Aporte de energia total:

$$H_t = 60 \frac{V \cdot I}{v} \text{ (J/cm)} \quad (1)$$

2.6 Produtividade

2.6.1 Qualidade

Os Ensaaios Não Destrutivos (END) são técnicas utilizadas na inspeção de materiais e equipamentos sem danificá-los e são definidos como testes para o controle da qualidade, realizados sobre peças acabadas ou semiacabadas, para a detecção de defeitos ou falta de homogeneidade, através de princípios físicos definidos, sem prejudicar a posterior utilização dos produtos inspecionados (JUNIOR, MARQUES, 2006).

Os END estão entre as principais ferramentas do controle da qualidade de materiais e produtos e são amplamente utilizados nos setores de petróleo/petroquímico, químico, aeroespacial, siderúrgico, naval, eletromecânico e de papel e celulose, entre outros. Eles contribuem para a qualidade dos bens e serviços, redução de custo, preservação da vida e do meio ambiente, sendo fator de competitividade para as empresas que os utilizam.

Existem normas específicas para cada método de ensaio, por isso é importante a correta qualificação do profissional que irá realizar o ensaio e a elaboração de procedimentos conforme tais normas. Existem também normas que regulam empresas de END, tais como a ASME IX que também é utilizada para caldeiras e vasos de pressão.

Para obter resultados satisfatórios e válidos, é fundamental observar os seguintes elementos: pessoal treinado, qualificado e certificado; conduzir o ensaio segundo um procedimento qualificado elaborado com base em normas e critérios de aceitação previamente definidos e estabelecidos, em procedimento.

2.6.1.1 Ensaio Visual de Solda (EVS)

A inspeção visual foi provavelmente o primeiro ensaio não destrutivo usado pelo homem, mas continua sendo o mais usado e geralmente precede qualquer outro ensaio. A sua principal vantagem é fornecer dados quantitativos (além das informações qualitativas) mais facilmente que os outros END. Alguns testes são baseados nas leis da ótica geométrica e outros fazem uso das propriedades ondulatórias da luz (ANDREUCCI; 2014).

Este ensaio tem sido usado principalmente para a inspeção de: superfícies expostas ou acessíveis de materiais opacos e equipamentos parcial ou totalmente montados e objetos acabados; e, interior de objetos transparentes ou translúcidos, como o vidro, quartzo, alguns plásticos, além de líquidos e gases.

A inspeção visual é um ensaio largamente utilizado para avaliar as condições ou qualidade de uma solda ou componente onde uma rápida detecção e correção de defeitos significam economia. É de fácil execução, de baixo custo e comumente não requer equipamento especial. É considerado um método primário nos programas de controle de qualidade (ANDREUCCI, 2014).

2.6.1.2 Ensaio de Líquido Penetrante (LP)

Segundo Andreucci (2014), o ensaio por líquidos penetrantes é um método desenvolvido onde se pode obter a detecção de descontinuidades superficiais em peças metálicas. O ensaio baseia-se na ação da capilaridade, que é o poder de penetração de um líquido em locais extremamente pequenos devido a suas características físico-químicas como a tensão superficial. O poder de penetração é uma característica bastante importante uma vez que a sensibilidade do ensaio é enormemente dependente do mesmo.

O ensaio ou inspeção por líquido penetrante é considerado um dos melhores métodos de teste para detecção de descontinuidades superficiais em diferentes matérias como: metais ferrosos e não ferrosos, alumínio e ligas metálicas (ANDREUCCI; 2014).

2.6.1.3 Métodos do ensaio de líquido penetrante

O método de ensaio por líquidos penetrantes consiste na aplicação de um líquido, com características especiais, sobre a superfície da peça ou componente de interesse, de forma que, após um determinado tempo, este líquido penetre em descontinuidades presentes no material e que sejam abertas à superfície. Após um determinado tempo, o excesso de líquido é removido e um produto chamado revelador é aplicado sobre a superfície (ANDREUCCI; 2014).

Este material age de forma a retirar o líquido que penetrou na descontinuidade, formando uma imagem na superfície da peça, que será avaliada de acordo com a norma utilizada para a fabricação da peça ou componente.

O líquido penetrante fornece uma indicação ampliada da descontinuidade, tornando-a mais visível. As descontinuidades detectadas são analisadas quanto à localização, orientação, dimensões, tornando fácil a interpretação e avaliação (ANDREUCCI; 2014).

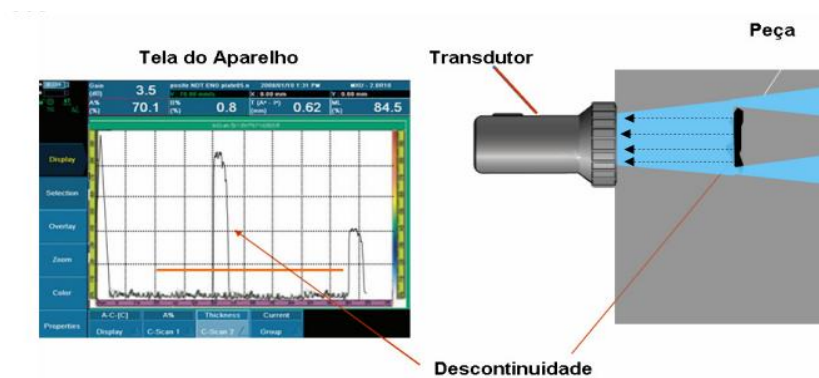
2.6.1.4 Ensaio de Ultrassom (UT)

O ensaio por ultrassom consiste em introduzir um feixe sônico de alta frequência no material que, ao percorrê-lo, é refletido por interfaces; as reflexões são detectadas e é feita uma análise para determinar a presença e a localização dessas interfaces revelando as possíveis descontinuidades (ANDREUCCI; 2014). As ondas sônicas são quase totalmente refletidas em interfaces metal-gás. Podem ocorrer reflexões parciais em interfaces metal-líquido ou entre um metal e outro sólido, sendo o percentual de energia dependente de certas propriedades físicas dos materiais que compõem a interface. Descontinuidades como trincas, poros, falta de fusão e outros tipos, podem ser detectadas por ultrassom, pois geram uma interface sólido-gás de fácil detecção. Outras descontinuidades como inclusões, falta de penetração e outras podem ser também detectadas por reflexão parcial ou espalhamento do feixe sônico, ou até mesmo pela produção de outros efeitos detectáveis (SILVA, I.C., 1999).

A inspeção por ultrassom é de grande importância na verificação industrial de materiais, é um método indispensável para o controle da qualidade do produto final. Defeitos como trincas, laminações, rechupes, poros, falta de fusão, podem ser facilmente detectados por ultrassom. Com a necessidade de detectar descontinuidades cada vez menores, a inspeção por ultrassom ganhou confiabilidade na indústria moderna, por ser um ensaio com grande poder de penetração, alta sensibilidade, e grande precisão para detecção e análise dos resultados. (ANDREUCCI; 2014).

A Figura 8 mostra o feixe sônico do transdutor, incidindo na descontinuidade e gerando uma reflexão captada pelo mesmo transdutor, que é enviada como sinal ao aparelho, e mostrado na tela em forma de um pulso ou eco.

Figura 8 - Feixe sônico do transdutor



Fonte: Ricardo Andreucci (2014)

Este ensaio possui elevado poder de penetração que permite a detecção de descontinuidades existentes no interior das peças, numa vasta gama de espessuras e materiais, assim como possui sensibilidade elevada na detecção de descontinuidades muito pequenas, o que acarreta em precisão na determinação da localização, dimensão e forma das descontinuidades. Além disso, não exige mais do que uma superfície acessível, embora seja recomendável a sondagem, a partir de diversas superfícies. É aplicável em inspeções de manutenção, pois, o equipamento, normalmente, é portátil (ANDREUCCI; 2014).

2.6.2 Sistemas de aquisição de dados de soldagem

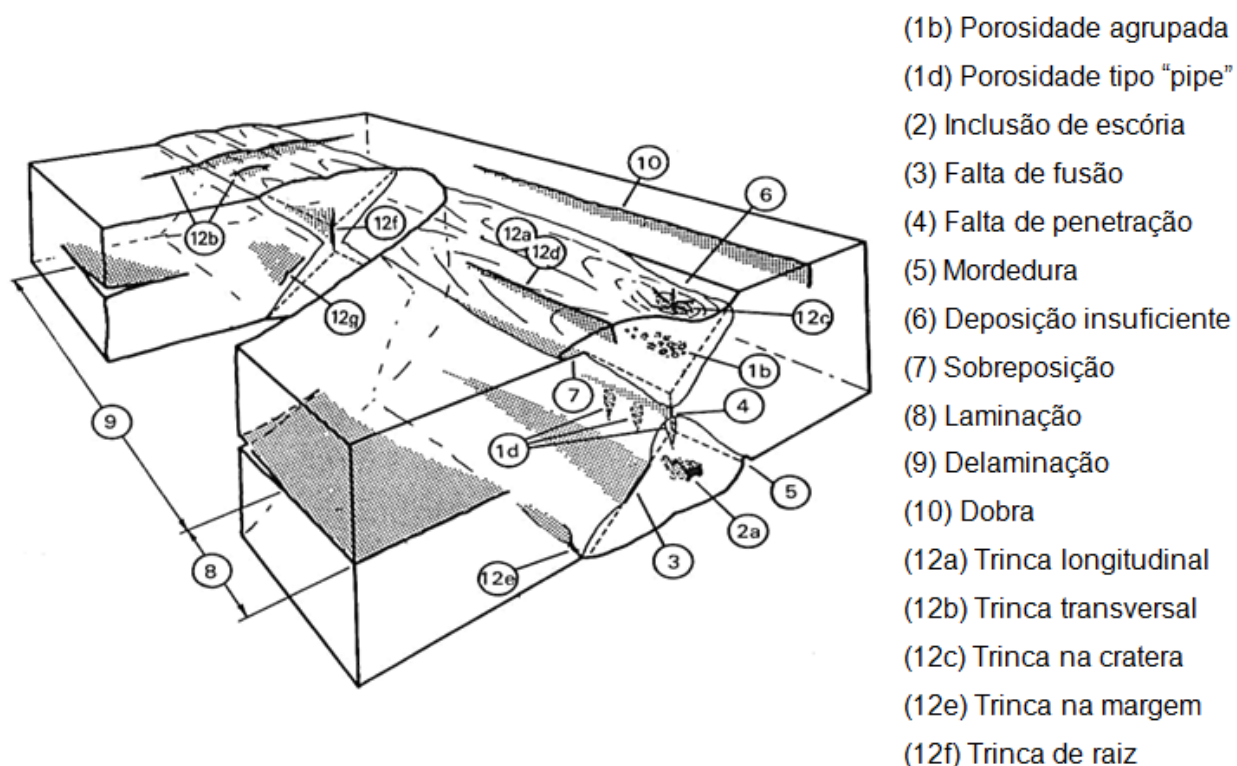
Painéis de controle mais elaborados fornecem dados de soldagem essenciais em tempo real, tornando mais fácil visualizar as métricas de desempenho e impactos na produtividade e eficiência da soldagem (LINCOLN ELECTRIC, 2021). Os dados adquiridos vão desde os parâmetros básicos de soldagem até a deposição de material. Os impactos de produção podem então ser estimados com estes dados.

2.6.3 Descontinuidades dos processos GMAW E FCAW

As soldas podem apresentar diversos defeitos internos e externos, bem como o aspecto externo das mesmas podem ser comprometidos, como a apresentação de reforço excessivo, mordeduras, porosidades, falta de penetração ou falta de fusão, influenciando seriamente na qualidade e na resistência mecânica (TELLES; 1996).

A Figura 9 ilustra as principais discontinuidades que podem ocorrer em uma solda de topo com penetração total, destacando os defeitos mais comuns nos processos GMAW/FCAW.

Figura 9 - Descontinuidades em solda em junta de topo



Fonte: Adaptado de FBTS (2010)

2.7 Custos em soldagem

A previsão dos gastos para fabricação de um produto soldado no processo (GMAW) pode ser realizada através da estimativa dos custos, onde uma análise inicial se realizada de forma correta pode diminuir custos (MARQUES, MODENESI e BRACARENSE, 2005). O custo total da soldagem pode ser calculado segundo a Equação 2.

$$\text{Custo total da soldagem} = C = C1 + C2 + C3 + C4 \text{ R\$} \quad (2)$$

A Tabela 1 apresenta equações utilizadas para simplificar o cálculo de um processo de soldagem:

Tabela 1 - Custos de soldagem

Custo	Equação	Var.	Descrição	Unidade
Metal de adição (C1)	$Ce = \frac{m_s}{\phi} C_{eU}$	MS	Massa de metal depositado	(Kg)
		ϕ	Eficiência de deposição conforme pesagem dos corpos de prova	(Kg)
		CeU	Preço por peso do eletrodo	(R\$/Kg)
Mão de obra, processo robotizado e custos fixos (C2)	$Cl = \frac{t_{ARC}}{\phi} (L + O)$	tARC	Tempo de arco aberto	(h)
		ϕ	Fator de operação	(%)
		L	Custos por unidade de tempo com mão de obra	(R\$/)
		O	Gastos fixos	(R\$)
Gás (CO2) (C3)	$Cg = V_G t_{ARC} C_{GU}$	VG	Vazão de gás utilizada	(kg/min)
		tARC	Tempo de arco aberto	(min)
		CGU	Preço por volume de gás	(R\$/kg)

Fonte: Adaptado de FIGUEREDO, CONCEIÇÃO E SOUZA (2021).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

O respectivo estudo seguiu uma sequência cronológica para realização. Foram separados os materiais tais como fonte de soldagem, alimentador de arame, chapas de teste, maçarico para corte e consumíveis.

3.1 Materiais

3.1.1 Material base

O material base para o teste foi o ASTM A131-DH36 com espessura de 1" (25,4mm). Este material é fornecido em chapas e foi cortado no tamanho padrão do teste, conforme descrito no capítulo Métodos.

Os requisitos de composição química e propriedades mecânicas do metal de base que será utilizado neste estudo estão de acordo com a norma ASTM parte "A" materiais A131-DH36, disponíveis nas Tabelas 2 e 3.

Figura 10 - Separação das chapas do metal base



Fonte: Autores (2021)

Tabela 2 - Requisitos químicos para o material base

Grades	AH/DH/EH 32, AH/DH/EH 36 and AH/DH/EH 40	FH 32/36/40
Deoxidation	Killed, Fine Grain Practice ^A	Killed, Fine Grain Practice ^A
Chemical composition ^B (table analysis), % max, unless specified in range		
C	0.18	0.16
Mn	0.90–1.60 ^C	0.90–1.60
Si	0.10–0.50 ^D	0.10–0.50 ^D
P	0.035	0.025
S	0.035	0.025
Al (acid soluble), min ^{E,F}	0.015	0.015
Nb ^{F,G}	0.02–0.05	0.02–0.05
V ^{F,G}	0.05–0.10	0.05–0.10
Ti	0.02	0.02
Cu ^H	0.35	0.35
Cr ^H	0.20	0.20
Ni ^H	0.40	0.40
Mo ^H	0.08	0.08
N	...	0.009
		0.012 (if Al present)

^A The steel is to contain at least one of the grain refining elements in sufficient amount to meet the fine grain practice requirement (see Section 7).

^B The contents of any other element intentionally added is to be determined and reported.

^C Grade AH 0.5 in. [12.5 mm] and under in thickness may have a minimum manganese content of 0.70 %.

^D Where the content of soluble aluminum is not less than 0.015 %, the minimum required silicon content does not apply.

^E The total aluminum content may be used instead of acid soluble content, in accordance with 7.1.

^F The indicated amount of aluminum, niobium, and vanadium applies when any such element is used singly. When used in combination, the minimum content in 7.2.2 and 7.2.3, as appropriate, will apply.

^G These elements need not be reported on the mill sheet unless intentionally added.

^H These elements may be reported as ≤0.02 % where the amount present does not exceed 0.02 %.

Fonte: ASTM A 131/A A131 M (2005)

Tabela 3 - Carbono equivalente produzido pelo TMCP

Grade	Carbon Equivalent ^A , max, %	
	$t \leq 2.0$ in. [50 mm]	$t > 2.0$ in. [50 mm] $t \leq 4.0$ in. [100 mm]
AH32, DH32, EH32	0.36	0.38
FH32	0.36	
AH36, DH36, EH36	0.38	0.40
FH36	0.38	
AH40, DH40, EH40, FH40	0.40	

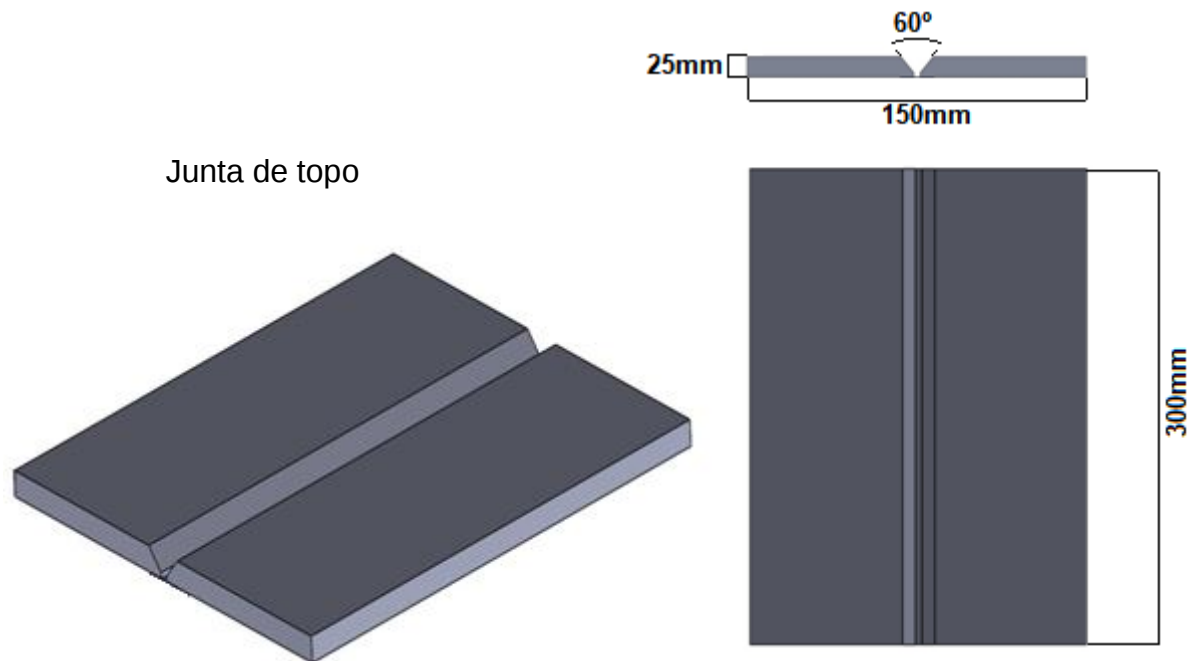
^A The following carbon equivalent formula shall be used to calculate the carbon equivalent, C_{eq} :

$$C_{eq} = C + \frac{Mn}{6} + \frac{Cr + Mo + V}{5} + \frac{Ni + Cu}{15} (\%) \quad (3)$$

Fonte: Adaptado do ASTM A 131/A A131 M (2005)

Os corpos de prova foram montados em uma junta tipo topo e com chanfro “V” com ângulo de 60°. A Figura 11 demonstra como as chapas foram montadas para a soldagem.

Figura 11 - Esboço da montagem das chapas de teste



Fonte: Autores (2023)

3.1.2 Material de adição 1

O eletrodo consumível utilizado para o processo de soldagem GMAW foi o ER70S-6 seguindo especificação ASME SFA 5.18 em forma de bobina de arame com bitola de 1,2mm, MERITS-6 fabricado pela Lincoln Electric.

As propriedades químicas e mecânicas deste material estão disponíveis nas Tabelas 4 e 5.

Tabela 4 - Propriedade química típica do arame maciço ER70S-6

MERIT™ S-6	C	Mn	Si	S	P	Cu	Ni	Cr	Mo
Especificado o AWS	0.06-0.15	1.40-1.85	0.80-1.15	<0.035	<0.025	<0.50	<0.15	<0.15	<0.15
Valor Típico	0.086	1.57	0.86	0.012	0.014	0.018	0.019	0.016	0.006

Fonte: Lincoln Electric (2021) MERIT™

Tabela 5 - Propriedades mecânicas típicas do arame maciço ER70S-6

MERIT™ S-6	Gás de Proteção	Limite de Escoamento (MPa)*	Resistência à Tração (MPa)*	Along. (%)*	Impacto CVN (J) @-30°C*
Especificado do AWS	CO ₂	400	480	≥22	≥27
Valor Típico		440	550	30	85

*Condição soldado

Fonte: Lincoln Electric (2021)

3.1.3 Material de adição 2

O eletrodo consumível utilizado para o processo de soldagem FCAW foi o E71T-1 de especificação ASME SFA 5.20 em forma de bobina de arame com bitola de 1,2mm, fabricado pela Lincoln Electric. As propriedades químicas e mecânicas estão disponíveis nas Tabelas 6 e 7.

Tabela 6 - Propriedades mecânicas típicas do arame tubular E71T-1

Consumível ASME II Parte C SFA 5.18	Escoamento (MPa)	Resistência (MPa)	Alongamento (%)	Impacto -20°C (J)
AWS Requerido E71T-1	400 min	490-670 min	22 min	27
Resultados de Testes (100%CO ₂)		560	30.5	156

Fonte: Lincoln Electric (2021)

Tabela 7 - Propriedade química típica do arame tubular E71T-1

Consumível ASME II Parte C SFA 5.18	%	Mn	Si	P	5%
AWS Requerido E71T-1	0.12% máx	1.75% máx	0.90% máx	0.030% máx	0.030% máx
Resultados de Testes (100%CO ₂)	0.03%	1.21%	0.36%	0.02%	0.01%

Fonte: Lincoln Electric (2021)

3.1.4 Conjunto de soldagem

A fonte de soldagem utilizada pode ser visualizada na Figura 12. O fabricante da fonte é a *Lincoln Electric*, modelo *Power Wave S350* o alimentador de arame, também do mesmo fabricante, foi o modelo *Power Feed 84*, mostrado na Figura 13. O conjunto é formado pela fonte do tipo inversor de solda multi-processo com ciclo de trabalho de 350A/31,5V@40%.

Figura 12 - Fonte de soldagem



Fonte: Autores (2023)

Figura 13 - Alimentador de arame



Fonte: Autores (2023)

3.1.5 Sistema de aquisição de dados

O sistema de aquisição de dados de soldagem utilizado foi o disponibilizado pelo fabricante do conjunto de soldagem.

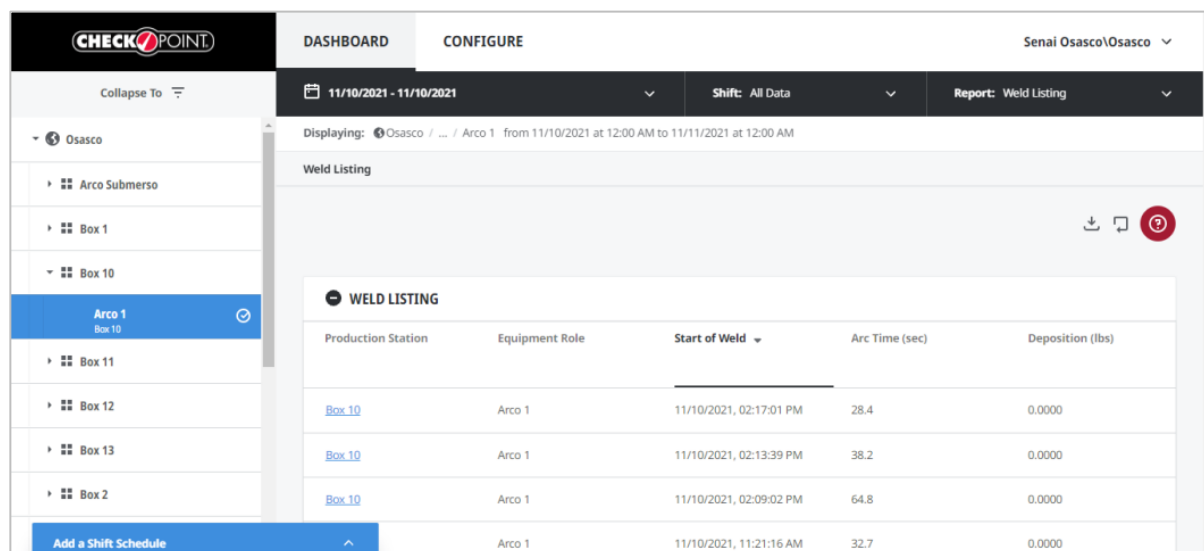
O sistema é nomeado como *Lincoln Checkpoint*. Todas as soldas efetuadas têm os seus dados e parâmetros registrados e enviados a uma nuvem, podendo ser consultados a qualquer momento através de uma conexão com a internet.

Neste sistema é possível, adquirir dados de soldagem tais como, tensão de solda, corrente de soldagem, velocidade de alimentação de arame utilizada, Energia aportada no cordão de solda, deposição de material consumível.

Os dados foram confrontados com os coletados manualmente. A Figura 14 ilustra a tela principal do sistema de aquisição de dados.

O sistema disponibiliza, além dos dados em sua própria interface de operação, a possibilidade de realizar o *download* destes dados de forma a formar uma planilha. Utilizamos estes dados para gerar a planilha comparativa dos dados de cada soldagem.

Figura 14 - Sistema de aquisição de dados de soldagem



The screenshot displays the Lincoln Checkpoint software interface. On the left is a sidebar with a tree view containing 'Osasco' and several 'Box' items (Box 1, Box 10, Box 11, Box 12, Box 13, Box 2). The main area has a top navigation bar with 'DASHBOARD' and 'CONFIGURE' tabs. Below this is a filter bar showing the date range '11/10/2021 - 11/10/2021', 'Shift: All Data', and 'Report: Weld Listing'. The main content area is titled 'Weld Listing' and contains a table with the following data:

Production Station	Equipment Role	Start of Weld	Arc Time (sec)	Deposition (lbs)
Box 10	Arco 1	11/10/2021, 02:17:01 PM	28.4	0.0000
Box 10	Arco 1	11/10/2021, 02:13:39 PM	38.2	0.0000
Box 10	Arco 1	11/10/2021, 02:09:02 PM	64.8	0.0000
	Arco 1	11/10/2021, 11:21:16 AM	32.7	0.0000

Fonte: Autores (2023)

3.1.6 Balança

Para a pesagem das chapas e corpos de prova foi utilizada uma balança digital da marca Toledo com capacidade máxima de 30 kg.

Figura 15 - Balança utilizada na pesagem das peças



Fonte: Autores (2023)

3.1.7 Taxa de deposição

A taxa de deposição foi calculada através da quantidade de material depositado por hora, logo, foi realizada a pesagem do material depositado dentro do tempo de soldagem. Além disso, utilizou-se o sistema de monitoramento o qual realiza este cálculo de maneira automática, apenas informando ao sistema qual a densidade do material e adição utilizados.

3.1.8 Rendimento de deposição

Para o rendimento foi calculado com os valores iniciais e finais dos corpos de prova e bobinas de arame, dividindo o peso de metal de solda depositado dividido pelo peso de arame consumido conforme Equação 4.

$$\text{Rendimento (\%)} = \frac{\text{Peso de metal de solda}}{\text{Peso do arame consumido}} \quad (4)$$

3.2 Métodos

3.2.1 Corte Das Chapas

O corte das chapas para os testes foi realizado com um maçarico pelo processo oxiacetilênico (Figuras 16 a 19). Os corpos de Prova foram cortados com uma seção transversal de 150mm e um ângulo de 30°, totalizando um chanfro de 60°.

Figura 16 - Corte das chapas para confecção dos corpos de prova



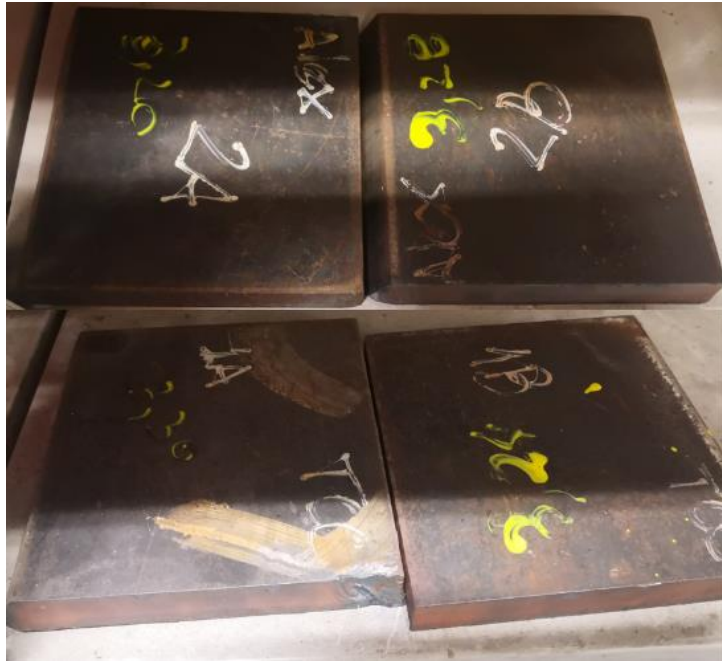
Fonte: Autores (2022)

Figura 17 – Corte das chapas para confecção dos corpos de prova (2)



Fonte: Autores (2022)

Figura 18 - Peças com corte final



Fonte: Autores (2023)

Figura 19 - Chanfro das chapas utilizadas para confecção dos corpos de prova



Fonte: Autores (2023)

Foi realizada a pesagem dos corpos de prova antes que a soldagem fosse realizada. O peso do corpo de prova para a Soldagem GMAW antes da soldagem foi 6,60Kg, conforme a Figura 20.

Figura 20 - Peso corpo de prova GMAW antes da soldagem



Fonte: Autores (2023)

O peso do corpo de prova para a soldagem FCAW antes da soldagem foi 6,55Kg conforme a Figura 21.

Figura 21 - Peso corpo de prova FCAW antes da Soldagem

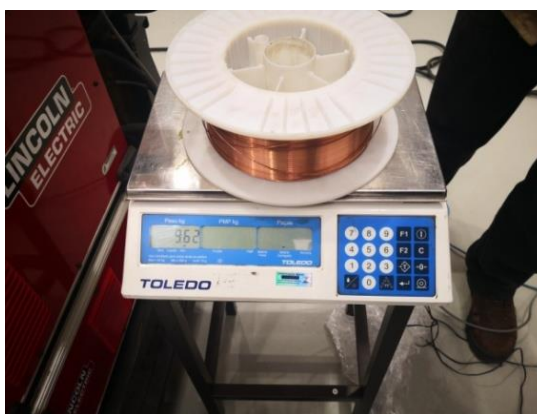


Fonte: Autores (2023)

3.2.2 Soldagem Dos Corpos De Prova

Antes de iniciar a soldagem, as chapas dos corpos de prova e bobina de arame consumível foram pesadas (Figuras 22 e 23). Os pesos para a bobina de arame maciço e de arame tubular foram de 9,62 kg e 5,84 kg respectivamente. Os corpos de prova foram soldados seguindo as especificações de parâmetros de soldagem fornecidos pelo fabricante dos consumíveis com ajustes durante a soldagem conforme necessidade do operador.

Figura 22 - Peso da bobina de arame maciço antes de realizar a soldagem



Fonte: Autores (2023)

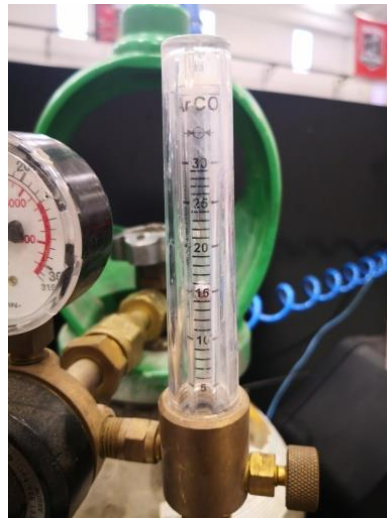
Figura 23 - Peso da bobina de arame tubular antes de realizar a soldagem



Fonte: Autores (2023)

A vazão de gás foi medida com um fluxômetro de gás aferido (Figura 24), desta forma é possível estimar a quantidade de gás utilizado nas soldagens de acordo com o tempo de arco aberto. A vazão utilizada no processo GMAW foi de 15 l/min e no processo FCAW foi de 18 l/min.

Figura 24 - Medição da vazão de gás para a soldagem GMAW



Fonte: Autores (2023)

Primeiramente foi realizado um passe de raiz, e posteriormente os passes de enchimento do chanfro e acabamento, para tal, foi gerada a tabela com todos os passes e parâmetros utilizados.

Após a finalização da soldagem dos corpos de prova (Figuras 25 e 26), eles foram pesados novamente para verificação do peso adicional do material depositado. As bobinas de arame também foram pesadas para verificação do consumo de material consumível utilizado.

Figura 25 - Corpo de prova GMAW Soldado



Fonte: Autores (2023)

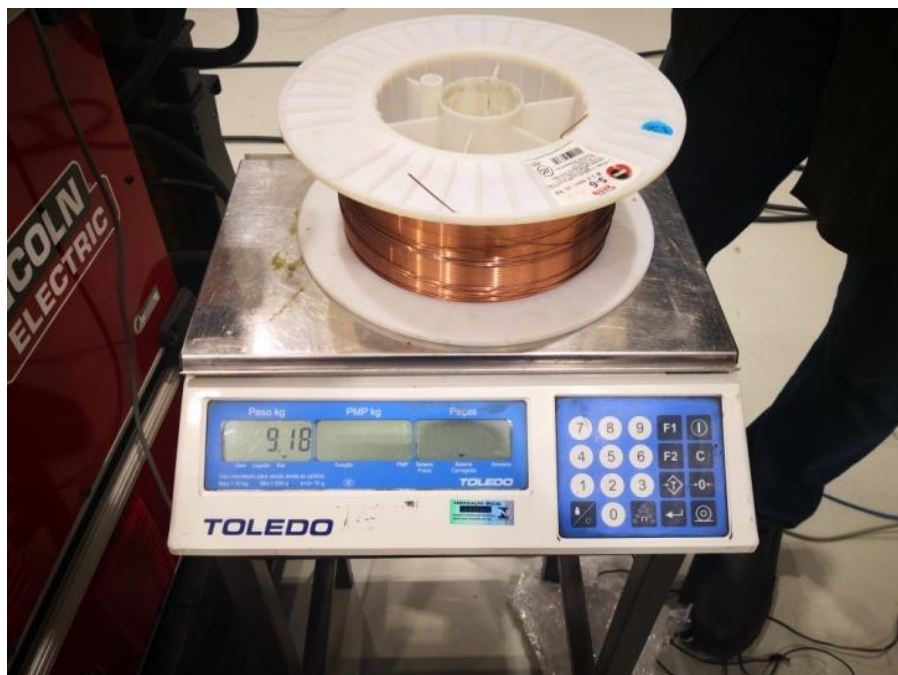
Figura 26 - Corpo de prova FCAW Soldado



Fonte: Autores (2022)

Os pesos das bobinas de arame maciço e tubular após a soldagem foram de 9,18 Kg e 5,30 kg respectivamente, conforme as Figuras 27 e 28.

Figura 27 - Peso da bobina de arame GMAW após a soldagem



Fonte: Autores (2022)

Figura 28 - Peso da bobina FCAW após a soldagem



Fonte: Autores (2022)

3.2.3 Custos de soldagem

A primeira tarefa efetuada foi a de cotação de valores para os consumíveis que foram utilizados em nossos ensaios. Foram cotados os valores do quilograma dos arames maciço e tubular e do m³ do Gás Carbônico (CO₂) a partir destes valores, foi possível realizar os cálculos de custos de consumíveis.

Também foi verificado o valor hora/homem de um soldador isso se faz necessário, pois com os tempos de soldagem com arco aberto de cada um dos consumíveis foi possível estimar o valor do custo de mão de obra e eficiência dos processos.

O custo do Kg do arame maciço ER70S-6 com diâmetro de 1,2mm foi de R\$ 19,00

O custo do Kg do arame tubular E71T-1 com diâmetro de 1,2mm foi de R\$ 27,00

O custo do M³ do gás carbônico CO₂ foi de R\$12,00

O valor hora/homem estimado foi de R\$ 13,00

Os tempos de arco aberto para cada processo foram:

- GMAW: 9 minutos e 22 segundos
- FCAW: 10 minutos e 33 segundos

3.2.4 Utilização do sistema de monitoramento

Utilizamos o sistema de aquisição de dados, conhecido popularmente como Monitoramento para confrontarmos os dados obtidos manualmente.

O sistema disponibiliza, além dos dados em sua própria interface de operação, a possibilidade de realizar o *download* destes dados de forma a formar uma planilha. Utilizamos estes dados para gerar a tabela comparativa dos dados de cada soldagem.

4 RESULTADOS

Através das informações coletadas, obtivemos resultados quantitativos e semelhantes entre os dados obtidos de forma manual e os dados obtidos pelo sistema de monitoramento, além disso, foi possível definir qual dos processos deste estudo é o mais viável economicamente para a soldagem do material base em questão. Obviamente, deve-se obter os custos de um equipamento que possua tal sistema de aquisição e comparar se, em longo prazo, o sistema é mais viável economicamente do que a aquisição manual destes dados. Foram considerados os custos de materiais de adição, gases de proteção, e consumíveis. Não foram considerados os fatores qualidade e erro humano pelo fato de este estudo levar em consideração apenas qual dos processos é o mais eficiente para a aplicação em questão.

4.1 Ensaios de END

Os ensaios não destrutivos (END) são técnicas aplicadas durante processo de fabricação a inspeção de materiais e produtos, semiacabados ou acabados para a detecção de falta de homogeneidade ou descontinuidades sem danificá-los podem ser empregados na fase de fabricação, construção e montagem. Os ensaios mais utilizados são: Visual, Líquido Penetrante, Ultrassom.

4.1.1 Ensaio visual

O ensaio visual foi o primeiro ensaio não destrutivos a ser realizado durante a inspeção de soldagem. Basicamente, a sequência de cada ensaio visual se compõe das etapas de preparação da superfície, Inspeção pelo método visual previsto no procedimento qualificado verificando o perfil ou tamanho de solda incorreto, irregularidade na aparência do cordão, poros superficiais, falta de penetração em soldas topo feita de um só lado, trincas superficiais no metal de solda sempre sob iluminação adequada todos os outros devem ser executados após a inspeção visual. (ALCAN; 2001).

Ao final do processo de soldagem conforme a Figura 29, foi analisado o aspecto visual dos cordões possíveis descontinuidades conforme critérios de aceitação da norma AWS D1.1 (2010) item 4.1.1 que corresponde a Inspeção Visual (Tabela 8).

Figura 29 - Preparação dos corpos para ensaio END



Fonte: Autores (2023)

Tabela 8 - Critérios de aceitação resultados e resultados

Descontinuidade	Critérios	GMAW Encontrado	FCAW Encontrado
Trincas	Não Permitido	Inexistente	Inexistente
Falta de Fusão	Não Permitido	Inexistente	Inexistente
Falta de Penetração	Não Permitido	Inexistente	Inexistente
Mordeduras	$\leq 1\text{mm}$	Inexistente	Inexistente
Porosidades	$< 1\text{mm}$	Inexistente	Inexistente

Fonte: Autores (2023)

4.2 Líquido penetrante

Ao finalizar o ensaio visual foi realizado ensaio de Líquido penetrante a fim de detectar possíveis descontinuidades nas soldas não visíveis a olho nu (Figura 30).

Figura 30 - Ensaio com líquido penetrante

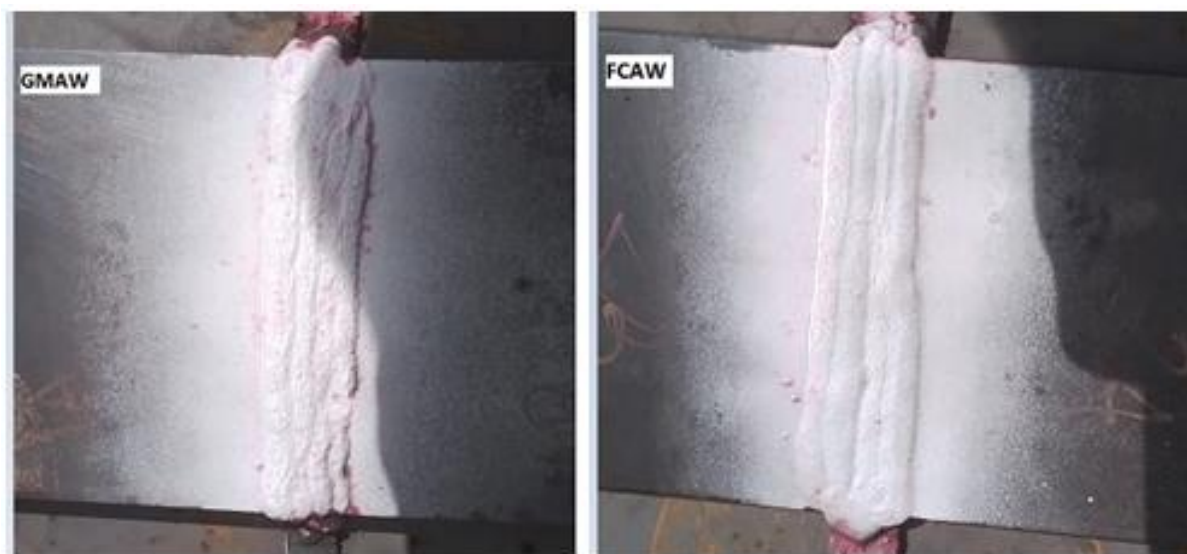


Fonte: Autores (2023)

4.2.1 Aplicação revelador

Ao fim da aplicação do penetrante (Figura 31), foi aguardado cerca de 15 minutos e após lavagem e aplicação do revelador e constatou que os corpos de prova estão livres de descontinuidades superficiais, portanto pode se considerar aprovado e pronto para a próxima etapa de análise da solda.

Figura 31 - Aplicação do revelador



Fonte: Autores (2023)

Vale ressaltar que aspectos como trincas, falta de fusão e de penetração são inaceitáveis de acordo com o critério de aceitação disposto no AWS D1.1 (2010). A Tabela 9 demonstra o comparativo das análises visuais.

Tabela 9 - Descontinuidades e critérios de aceitação resultados

Descontinuidades	Critério de aceitação	GMAW Encontrado	FCAW Encontrado
Trincas	Inexistente	Inexistente	Inexistente
Falta de fusão	Inexistente	Inexistente	Inexistente
Falta de penetração	Inexistente	Inexistente	Inexistente
Indicações grandes	5mm	Inexistente	Inexistente
Indicações arredondadas e em linha	Separadas até 1,5mm	Inexistente	Inexistente

Fonte: Autores (2023)

4.3 Ultrassom

4.3.1 - Análise ultrassom

Ensaio de ultrassom (Figura 32), realizado com o intuito de detectar possíveis descontinuidades superficiais e subsuperficiais. Não foi encontrada quaisquer descontinuidades no final do ensaio . Portanto, os corpos de prova foram aprovado na etapa de ensaio não destrutivo, conforme Figura 32 GMAW e FCAW, demonstrando-se conforme os critérios de aceitação disposto no AWS D1.1 (2010), onde todas as indicações como trincas, falta de fusão ou penetração incompleta seriam consideradas inaceitáveis, conforme Tabela 10.

Figura 32 - Ensaios de Ultrassom



Fonte: Autores (2023)

Tabela 10 Descontinuidades e critérios de aceitação resultados

Descontinuidades	Critério de aceitação	GMAW Encontrado	FCAW Encontrado
Trincas	Inexistentes	Inexistente	Inexistente
Falta de fusão	Inexistentes	Inexistente	Inexistente
Falta de penetração	Inexistentes	Inexistente	Inexistente
Indicações*	3mm	Inexistente	Inexistente

Fonte: Autores (2023)

4.3.1 – Composição química

A análise de composição química (Tabela 11) realizado pelo laboratório TeamLab gerado relatório nº REL15693/22 para comparação conforme norma ASTM A751-20.

Tabela 11 - Ensaio composição química metal de base

Concentração dos elementos químicos na amostra (% de massa) (Concentration of elements in the sample (% weight)).												
AQ	C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Nb	Al	Cu	Co
Encontrado (Found)	0,144	0,208	0,659	0,021	0,013	0,020	0,005	0,000	0,000	0,027	0,003	0,000
AQ	B	Ti	V	W	Ca	Ce	La	Pb	Sn	Sb	Te	Zr
Encontrado (Found)	0,0003	0,000	0,001	0,000	0,003	0,020	0,002	0,000	0,000	0,001	0,001	0,002

Fonte: Autores (2023)

4.4 Taxa de deposição

A taxa de deposição foi calculada através da divisão do valor de material depositado por tempo de arco aberto. Os valores obtidos podem ser visualizados na Tabela 8.

Tabela 8 - Taxa de deposição

Processos	Material depositado (Real) (Kg)	Material depositado (Sistema) Kg	Tempo de arco aberto (hs)	Condição Calculada (Kg/h)	Sistema de Monitoramento (Kg/h)
GMAW	0,440	0,425	0,156	2,82	2,72
FCAW	0,540	0,63	0,174	3,10	3,36

Fonte: Autores (2023)

4.5 Rendimento de deposição

O rendimento foi calculado com os valores iniciais e finais dos corpos de prova e bobinas de arame, de forma que a diferença final ditou o rendimento de cada um dos processos, conforme a Tabela 9.

Tabela 9 - Rendimento de deposição

Processos	Peso inicial corpo de prova (Kg)	Peso final corpo de prova (Kg)	Peso inicial Bobina (Kg)	Peso final Bobina (Kg)	Rendimento (%)
GMAW	6,6	7,02	9,62	9,18	95,6
FCAW	6,55	7,03	5,84	5,30	89

Fonte: Autores (2023)

4.6 Custos

4.6.1 Custos calculados (Coleta de dados manuais)

Os custos totais calculados podem ser visualizados nas Tabelas 12 e 13 abaixo. As tabelas consideram todos os custos.

Tabela 12 - Custos calculados GMAW

Tipo	GMAW				
Descrições	Arame	Energia	Acabamento	M.O.	Gás
Custos	8,619	8,619	8,619	8,619	8,619
		0,523	0,523	0,523	0,523
			1,042	1,042	1,042
				5,208	5,208
					1,174
					16,566
Total	R\$ 16,57				

Fonte: Autores (2023)

Tabela 13 - Custos calculados FCAW

Tipo	FCAW				
Descrições	Arame	Energia	Acabamento	M.O.	Gás
Custos	16,200	16,200	16,200	16,200	16,200
		0,720	0,720	0,720	0,720
			2,466	2,466	2,466
				8,136	8,136
					1,572
					29,094
Total	R\$ 29,09				

Fonte: Autores (2023)

4.6.2 Custos utilizando dados do monitoramento

O sistema de monitoramento não contabiliza os dados de consumo energético, ele apenas calcula os tempos de soldagem e do processo em efetividade global. Com isso, foram coletados dados do sistema e inseridos em uma tabela para o comparativo.

Os dados coletados pelo sistema e calculados manualmente podem ser visualizados nas Tabelas 12 e 13 abaixo. Os valores individuais de consumo podem ser visualizados nos gráficos das figuras 33, 34, 35 e 36 abaixo.

Tabela 14 - Custos calculados com dados do monitoramento para o processo GMAW

Tipo	GMAW				
Descrições	Arame	Energia	Acabamento	M.O.	Gás
Custos	8,325	8,325	8,325	8,325	8,325
		0,523	0,523	0,523	0,523
			1,042	1,042	1,042
				5,208	5,208
					1,174
					16,272
Total	R\$ 16,27				

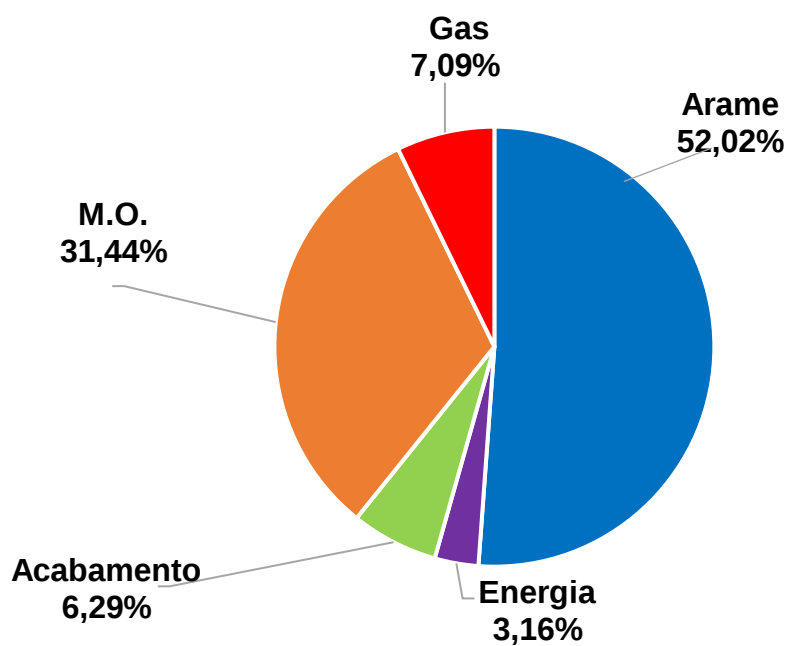
Fonte: Autores (2023)

Tabela 15 - Custos calculados com dados do monitoramento para o processo FCAW

Tipo	FCAW				
Descrições	Arame	Energia	Acabamento	M.O.	Gás
Custos	18,900	18,900	18,900	18,900	18,900
		0,720	0,720	0,720	0,720
			2,466	2,466	2,466
				8,136	8,136
					1,572
					31,794
Total	R\$ 31,79				

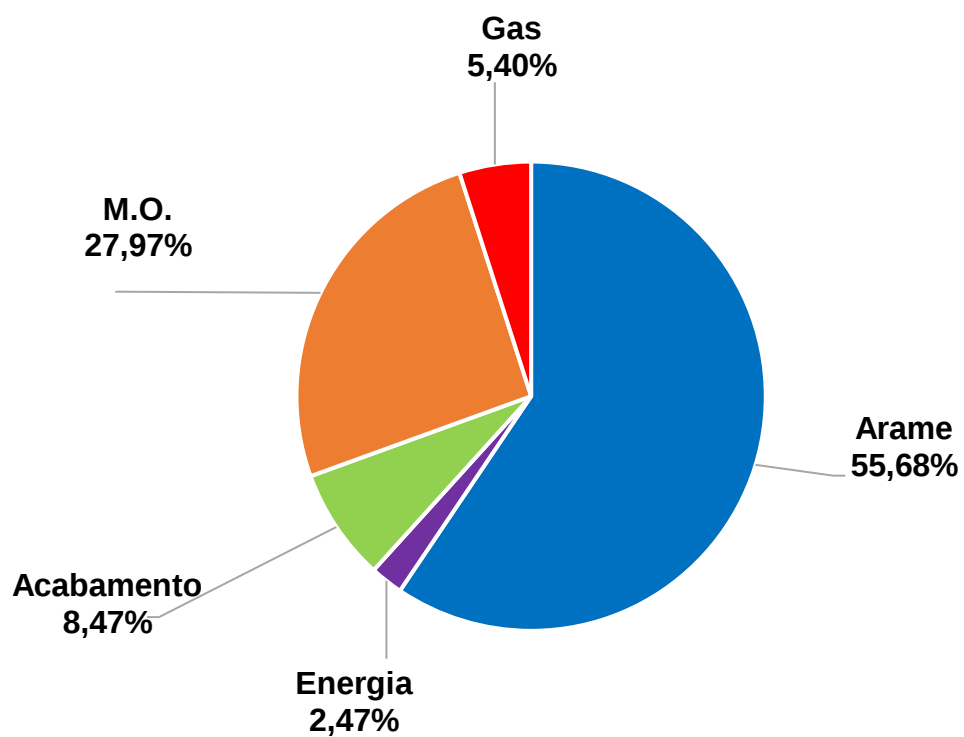
Fonte: Autores (2023)

Figura 33 - Representação dos custos individuais calculados no processo GMAW



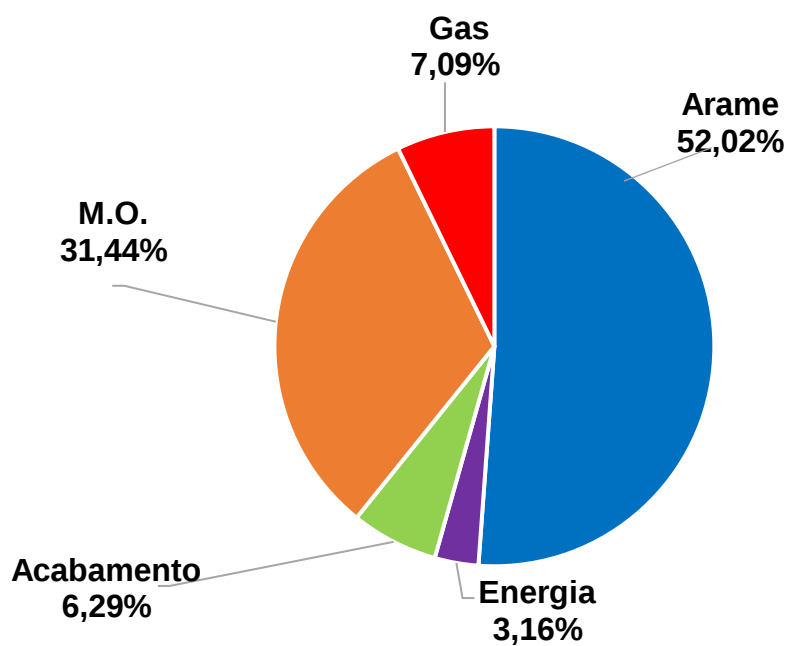
Fonte: Autores (2023)

Figura 34 - Representação dos custos individuais calculados no processo FCAW



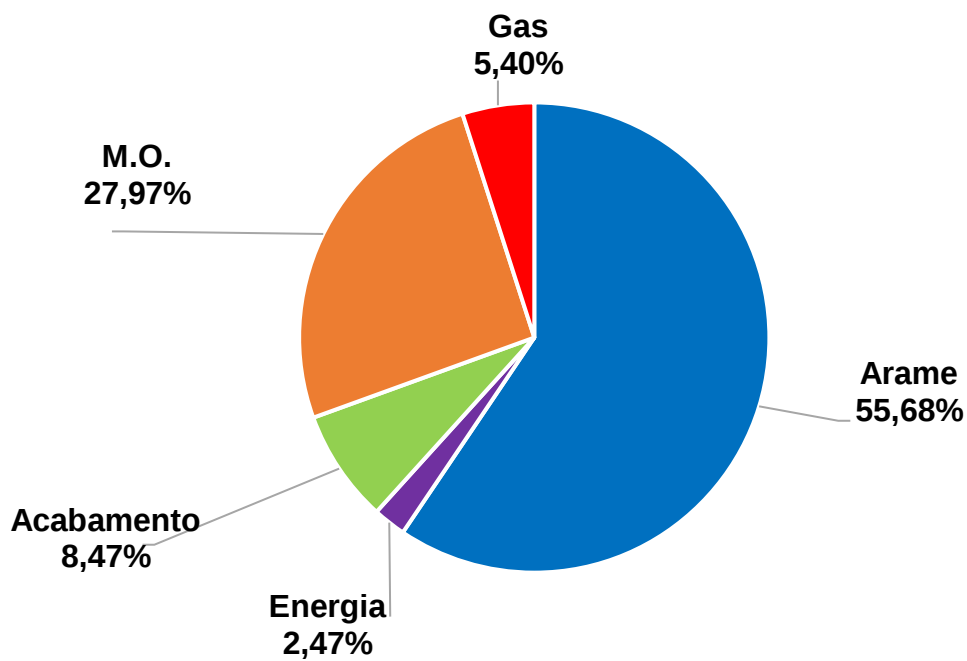
Fonte: Autores (2023)

Figura 35 - Representação dos custos individuais no processo GMAW usando dados do monitoramento



Fonte: Autores (2023)

Figura 36 - Representação dos custos individuais no processo FCAW usando dados do monitoramento



Fonte: Autores (2023)

5. CONCLUSÃO

A partir da definição do método de pesquisa, que consiste em uma pesquisa quantitativa, obtivemos resultados satisfatórios que ajudarão os pesquisadores e profissionais a definirem qual dos dois processos é o ideal quando colocado em pauta os custos totais e controle do processo.

Podemos concluir também que na data em que este trabalho foi realizado, o sistema de monitoramento funciona como uma ferramenta facilitadora da coleta de dados para os cálculos de custos, não podendo ainda substituir o trabalho operacional em 100% devido a pequenas diferenças nos valores obtidos, e ainda, ao menos o sistema utilizado, não calcula os custos dos consumíveis, gás de proteção e também, à época destes testes, não estimava o consumo do gás de proteção. Por outro lado, o sistema realiza cálculos interessantes que não estão constantes neste trabalho, tais como efetividade global do processo, Tempos planejados versus tempos reais de arco aberto, deposição real e deposição planejada e fator de operação, os quais entendemos que sejam essenciais em um processo fabril para controle de produção, e ajudariam a calcular custos de operação. E apesar das diferenças nos valores, estes são muito parecidos.

O estudo, tanto na coleta de dados manuais e na coleta de dados através do sistema de monitoramento, indica que para a soldagem do objeto de estudo, o processo GMAW é o mais viável, tanto no quesito dos custos de consumíveis e mão de obra, quanto nos quesitos de tempo, onde se faz necessário um tempo maior de operação no processo FCAW.

Os ensaios destrutivos e não destrutivos, não encontraram quaisquer discontinuidades que desabonassem as soldagens e consequentemente os corpos de prova, de maneira que ambos foram aceitos para a conclusão do estudo em questão.

O sistema de monitoramento utilizado não calcula os custos de soldagem, sendo necessário coletar os dados e inseri-los em uma planilha para cálculo, o que faz que este trabalho ainda tenha que ser realizado manualmente. Desta forma, de acordo com os dados coletados tanto pelo sistema de monitoramento quanto manualmente, conclui-se que, para a aplicação escolhida no tema deste trabalho, a soldagem através do processo GMAW utilizando o CO₂ como gás de proteção mostrou-se mais viável. Obviamente, a depender do ambiente e variáveis do processo e localização, estes resultados podem sofrer modificações.

REFERÊNCIAS

ARAÚJO, W. R.; **Comparação entre a soldagem robotizada com arame sólido e metal cored – A ocorrência do “finger”**. Dissertação (Mestrado em Engenharia) – Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2004.

ESAB. **Apostila de Soldagem MIG/MAG, 2005**. Disponível em: <https://www.esab.com.br/br/pt/education/apostilas/upload/1901104rev0_apostilasoldagemMAGmag_low.pdf>. Acessado em: 15 mai.2021.

FORTES, C. **Apostila de soldagem MIG/MAG**. ESAB, Janeiro, 2005

MACHADO, I. G. **Soldagem e Técnicas Conexas: Processos**, Laboratório de Soldagem e Técnicas Conexas, UFRGS, Porto Alegre 1996, 477p.

MARQUES, P. V.; MODENESI, P. J.; BRACARENSE, A. Q. **Soldagem: fundamentos e tecnologia**. 3. ed. Belo Horizonte: UFMG, 2009.

MARQUES, P.V., MODENESI, P.J., BRACARENSE, A.Q., **Soldagem Fundamentos e Tecnologia**. Belo Horizonte, Editora UFMG, 2009.

MODENESI, P. J. **Introdução à física do arco elétrico**. Belo Horizonte: Editora DEMM-UFMG, 2001

OKUMURA, T., TANIGUCHI, C. **Engenharia de Soldagem e Aplicações**. São Paulo, LTC, 1982.

TREMONTI, M. A. **Requisitos organizacionais à introdução da robótica: o caso do processo de soldagem ao arco elétrico sob proteção gasosa**. Dissertação (Mestrado) – Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – São Paulo. 1999.

WAINER, E., BRANDI, S.D., MELLO, F.D.H., **Soldagem Processos e Metalurgia**. São Paulo, Editora EDGAR BLUCHER LTDA, 2004.

BRACARENSE, A. Q., MODONESI, P. J., MARQUES, P. V. **Soldagem – Fundamentos e tecnologia**. Belo Horizonte: Editora UFMG, 2009. 362 p

SOUZA, C. I. "Análise comparativa dos processos de soldagem GMAW e FCAW com transferência metálica por curto-circuito na posição horizontal". 2011, 121p. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia

WEMAN, K. **“Welding processes handbook”** 2003 41p

LINCOLN ELECTRIC. **“Gas metal arc welding guidelines, product and procedure selection”**, 2014

LINCOLN ELECTRIC. **“Catálogo de consumível REDFORCE 71C”** Disponível em: [http://www.lincolnelectric.com.br/upload/redforce-71c\(2\).pdf](http://www.lincolnelectric.com.br/upload/redforce-71c(2).pdf)

LINCOLN ELECTRIC. **“Catálogo de consumível MERIT S-6”** Disponível em: [http://www.lincolnelectric.com.br/upload/merit-s-6\(4\).pdf](http://www.lincolnelectric.com.br/upload/merit-s-6(4).pdf)